



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**LETECKÝ ÚSTAV**

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**ZAVÁDĚNÍ BEZOLOVNATÝCH PALIV V LETECTVÍ**

THE INTRODUCTION OF UNLEADED FUELS IN AVIATION

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Lukáš Pilíšek

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.

BRNO 2017

## Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **Lukáš Pilíšek**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### Zavádění bezolovnatých paliv v letectví

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Letecké pístové motory stále využívají jako palivo letecký benzín obsahující jedovatou složku tetraetylolovo. Ta je již v palivech pro pozemní dopravu zakázána. Je snaha tento trend aplikovat i v letectví. Práce má zmapovat současný stav a popsat iniciativy vedeoucí k zavedení bezolovnatých leteckých paliv.

#### Cíle bakalářské práce:

- Popsat v současnosti dostupné druhy paliv pro pístové letecké motory s uvedením jejich negativního dopadu na životní prostředí.
- Zmapovat probíhající iniciativy vedoucí k zavedení leteckých paliv pro pístové motory, která budou šetrná k životnímu prostředí.

#### Seznam literatury:

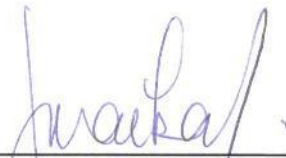
KOCÁB J. Letadlové motory. 1. vyd Praha : Kant, 176 s., 2000, ISBN 80-902914-0-6.

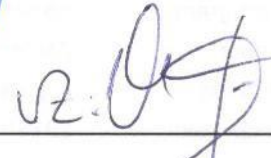
NBAA. [online]. 8.11.2016 [cit. 2016-11-08]. Dostupné z: <https://www.nbaa.org/ops/environment/avgas/>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 8. 11. 2016



  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá palivy pro letecké pístové motory. Práce je rozdělena na dvě hlavní části. První kapitola popisuje problematiku současných olovnatých paliv a vliv tetraethylolova na oktanové číslo. Druhá kapitola je věnována vývoji bezolovnatých paliv, včetně faktorů, které omezují jejich zavádění na trh.

## KLÍČOVÁ SLOVA

olovnatá paliva, tetraethylolovo, oktanové číslo, bezolovnatá paliva

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with fuels for air piston engine. The thesis is divided into two main parts. The first chapter describes problems of current lead fuels and influence of tetraethyllead on the octane number. The second chapter is dedicated to the development of unleaded fuels including factors which are limiting their introduction to the market.

## KEYWORDS

leaded fuels, tetraethyllead, octane number, unleaded fuels

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

PILÍŠEK, L. *Zavádění bezolovnatých paliv v letectví*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 32 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Miroslava Šplíchala, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. května 2017

.....

Lukáš Pilíšek

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Miroslavu Šplíchalovi, Ph.D. za jeho odborné rady, důležité připomínky a trpělivost při tvorbě této bakalářské práce. Dále chci poděkovat své rodině a přátelům za nesmírnou podporu a důvěru během studia i mimo něj.

## OBSAH

Úvod .....	9
1 Paliva pro letecké pístové motory .....	10
1.1 Rozdělení leteckých paliv .....	11
1.2 Kvalita paliv .....	11
1.3 Spotřeba paliv .....	13
1.4 Vlastnosti paliv .....	14
1.4.1 Bezpečnostní vlastnosti .....	17
1.4.2 Vliv tetraetylova na letecké motory, oktanové a výkonnostní číslo .....	18
1.4.3 Přísady .....	19
2 Bezolovnatá paliva .....	20
2.1 Přejchod na bezolovnatá paliva .....	20
2.2 Faktory ovlivňující vývoj a zavádění bezolovnatých paliv .....	21
2.2.1 Trh a ekonomika .....	21
2.2.2 Certifikace .....	21
2.2.3 Detonační spalování .....	23
2.2.4 Produkce a distribuce .....	24
2.2.5 Životní prostředí .....	25
2.3 Alternativní náhrady leteckého olovnatého benzínu .....	25
2.3.1 MOGAS .....	25
2.3.2 82UL .....	26
2.3.3 91/96 Hjelmcó Oil .....	26
2.3.4 94UL .....	27
2.3.5 AVGAS 100LL se sníženým obsahem olova .....	27
2.3.6 100SF .....	27
2.3.7 G100UL .....	28
Závěr .....	29
Použité informační zdroje .....	30
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	32



## ÚVOD

Už od dávných časů bylo přáním lidstva proletět se po obloze. První vážné pokusy se objevily na konci 19. století a odstartovaly tak vývoj letecké dopravy. Jedny z prvních letounů byly vybaveny motory, které poháněl automobilový benzín. Jelikož paliva i motory jsou vzájemně závislé součásti jednoho systému, tak zpočátku nebylo jednoduché využít jejich potenciál naplno.

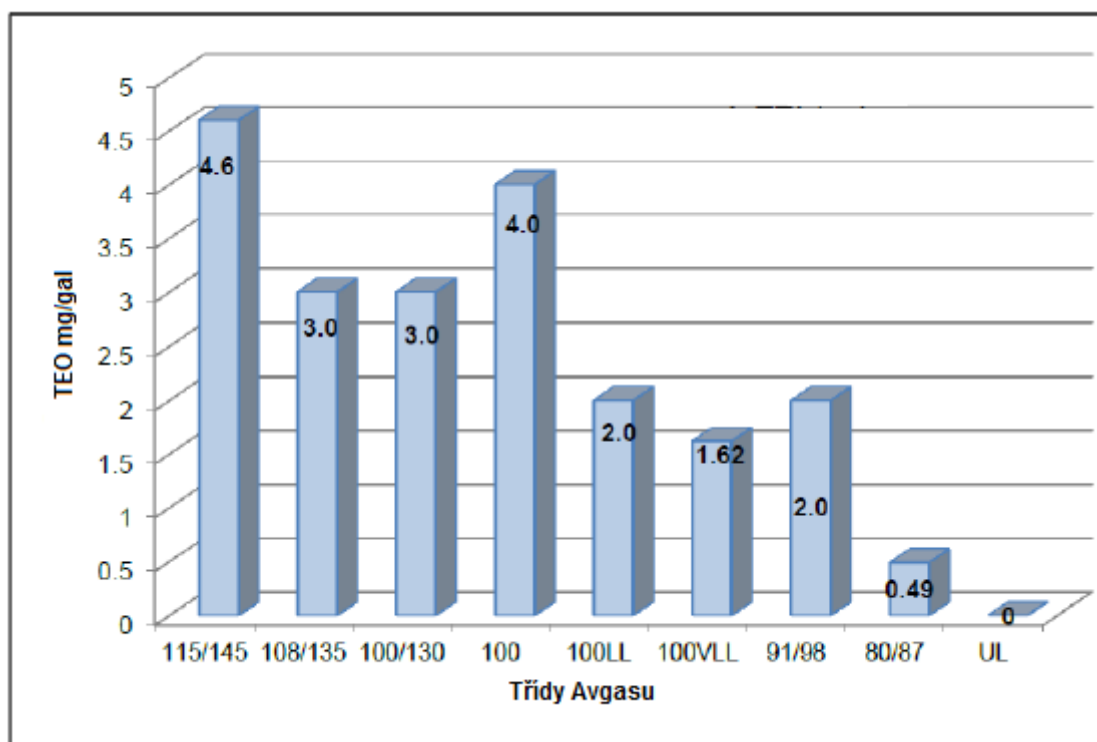
Velmi důležitým okamžikem se stal objev sloučeniny zvané tetraetylolovo (TEO), která zlepšila vlastnosti paliv a umožnila dosáhnout zvýšeného výkonu jednotlivých letounů. V následujících letech se objevila celá řada leteckých benzínů se zvýšeným obsahem TEO, což přineslo i spoustu negativních dopadů na životní prostředí. Kromě znečišťování ovzduší a kontaminace půdy má nepříznivý vliv na lidské zdraví. S rostoucím tlakem veřejnosti a legislativy se zakázalo použití olovnatých benzínů v silniční dopravě a podobný trend je snaha aplikovat i v letectví. Tato bakalářská práce se bude zabývat zejména palivy pro letecké pístové motory a možným přechodem bezolovnatých benzínů do provozu.

## 1 PALIVA PRO LETECKÉ PÍSTOVÉ MOTORY

Základním palivem je letecký benzín AVGAS, který se po celou dobu historie vyvíjel s cílem dosáhnout co největšího výkonu motoru na jednotku hmotnosti. Kvalita se určuje podle hodnoty oktanového čísla, získaného pomocí testovacích metod chudé a bohaté směsi.

V roce 1930 představila americká armáda první letecké palivo s označením 80/87. S nástupem 2. světové války došlo k největšímu rozvoji ve výrobě a vznikla nová třída 115/145, která dosahovala největšího oktanového čísla ze všech dostupných druhů. Po roce 1950 existovalo šest různých variant paliv využívaných hlavně v armádních a komerčních letounech. [2]

Nezadržitelný pokrok v pohonných jednotkách způsobil postupný přechod z pístových leteckých motorů na turbínové. Tato změna vedla k omezení výroby leteckých benzínů a na trh se zavedl AVGAS 100/130. Z důvodu předcházení chyb při manipulaci se změnilo původní dvojité označení na jednoduché podle obsahu chudé směsi, čímž vznikl AVGAS 100. V roce 1970 byl zaveden zákon o ochraně ovzduší, který přikazoval důslednější kontroly olova v palivech. Úsilí zmírnit ekologickou hrozbu přivedlo výrobce k zavedení méně škodlivé verze AVGASU 100LL s nižším obsahem olova. [1], [2], [3]



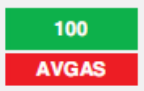


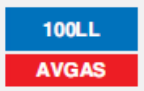


Obr. 1.1 Historický obsah TEO v leteckých benzínech [2]

## 1.1 ROZDĚLENÍ LETECKÝCH PALIV

V minulosti existovalo několik tříd paliv pro letecké pístové motory. Mezi nejznámější patřily AVGAS 80/87 (červená barva), 100/130 (zelená barva), 115/145 (fialová barva) a 100LL (modrá barva). Velká dostupnost leteckých benzínů se stala příčinou přidávání barviv do paliv. Slouží především jako ochrana proti možné kontaminaci nebo smíchání pohonných látek s jiným druhem. Pro zvýšení bezpečnosti při tankování a zamezení použití nesprávného paliva jsou cisterny, plnicí hadice i palivové nádrže letounů označeny štítkem a barevným pruhem pro určitý typ AVGASU (obrázek 1.2). [1], [4]

Letecké benzíny po přechodu komerčního a vojenského letectví na paliva pro tryskové motory, stále nacházejí své uplatnění. Využívají se v malých soukromých letounech nebo při výcviku. V současnosti se používají třídy AVGAS 100 a AVGAS 100LL. [1]

Třída paliva	Barva paliva	Regulační zařízení	Označení potrubí	Palivový štítek
AVGAS 100	Zelená			
AVGAS 100LL	Modrá			

Obr. 1.2 Barevné označení leteckého benzínu [4]

## 1.2 KVALITA PALIV

Od roku 1971 se agentura na ochranu životního prostředí (EPA) snaží zmírnit obsah škodlivých látek v ovzduší. Mezi hlavní nebezpečné látky patří přízemní ozon, oxid uhelnatý, oxidy síry, dusíku a olova. Postupná práce dosáhla úspěchu v podobě snížení olova ve veřejné dopravě. Přesto se stále vyskytuje v letectví, námořnictví i v některých stavebních strojích. Emise olova způsobují vážné zdravotní komplikace jako poruchy vývoje mozku u novorozenců, problémy s ledvinami nebo vyšší riziko srdečních onemocnění. Proto EPA v roce 2008 upravila normy vztahující se na obsah olova ve vzduchu z 1,5 mikrogramů/m<sup>3</sup> na 0,15/m<sup>3</sup>. Tento trend bude pokračovat než současná paliva nahradí bezolovnaté varianty. [5]

Před uvedením paliva na trh je nutné otestovat jeho složení a vlastnosti podle příslušných norem. Každý výrobce musí před získáním certifikátu uvést požadované specifikace na daný produkt. Jakmile prověřené palivo dostane certifikát letové způsobilosti jsou všechny výsledky testů společně s provozními omezeními uvedeny v letecké příručce. Požadavky na kvalitu jsou stanoveny mezinárodními organizacemi na kontrolu paliv ASTM International a Defence Standard 91-90. Obě jsou velmi podobné, ale liší se seznamem schválených přísad a menší odchylkou hodnot u některých vlastností (tabulka 1). Normy nevyžadují, aby letecké benzíny měly minimální množství olova, ale omezují horní přípustnou hranici. Hlavním důvodem přísných kontrol a testů je zabránit leteckým nehodám v důsledku použití nekvalitního paliva. [3], [6]

Tab. 1 Požadavky na AVGAS 100LL [3]

Vlastnosti	ASTM D 910	ASTM testovací metoda	DEF STAN 91-90	IP testovací metoda
Oktanové číslo	99,5	D 2700	99,5	IP 236
Výkonnostní číslo	130	D 909	130	IP 119
Koncentrace TEL		D 3341, D 5059		IP 270
[ml TEL/l]	0,53		0,53	
[g Pb/l]	0,56		0,56	
Barva	modrá	D 2392	modrá	IP 17
Obsah barviva				
Modré barvivo [mg/l]	2,7		2,7	
Hustota při 15 °C [kg/m <sup>3</sup> ]	zpráva	D 1298, D 4052	zpráva	IP 160
Destilace [°C]		D 86		IP 123
Počáteční bod varu	zpráva		zpráva	
Vypařený objem [%]				
10%, max	75		75	
40%, min	75		75	
50%, max	105		105	
90%, max	135		135	
Konečný bod varu	170		170	
Tlak par při 38°C [kPa]		D 323, D 5190		
Min	38		38	
Max	49		49	
Bod tuhnutí [°C]	-58	D 2386	-60	IP 16
Obsah síry [%]	0,05	D 1266, D 2622	0,05	IP 107

Bezpečnost pro letecký park se nesmí v žádném případě podcenit. Proto byly založeny organizace, které mají za úkol omezit riziko pomocí jistých předpisů.

Mezinárodní organizace pro civilní letectví (ICAO), zajišťuje mezinárodní normy a doporučení pro bezpečný civilní letecký provoz. Tyto předpisy jsou přebírány jednotlivými členskými státy a stávají se zákonnou normou. Větší část Evropy se řídí podmínkami evropské agentury pro bezpečnost letectví (EASA). Stanovuje společná pravidla v oblasti civilního letectví v rámci států evropské unie. Zabývá se především certifikací, údržbou a letovou způsobilostí letadel. [9], [10]

### 1.3 SPOTŘEBA PALIV

S rozvojem proudových motorů v civilním a vojenském letectví, došlo k postupnému omezení výroby leteckých benzínů. Tento pokrok byl příčinou náhrady pístových zážehových motorů a stávající benzíny nahradila nová trysková paliva. Pro účely provozování letounů s původními motory se vyrobila varianta s nízkým obsahem olova. Současně používaný AVGAS 100LL ale nevyhovuje všem strojům. Některé typy zvyklé na vysokooktanový benzín jsou nucené pracovat při nižším výkonu. Jiné zase vyžadují nízkooktanový benzín, protože současný způsobuje značné zanesení pracovního prostoru nečistotami. Z toho je patrné, že AVGAS 100LL je neutrální varianta mezi palivy s vysokým a nízkým oktanovým číslem, která svými vlastnostmi přesně vyhovuje pouze menší části leteckého parku. Zbýlá část (okolo 70 %) nepracuje při optimálních provozních podmínkách. [11]

Nižší využití pístových zážehových motorů je důvodem stále klesající poptávky po leteckém benzínu. Spotřeba se bude neustále snižovat, protože komerční společnosti, které spotřebovávají největší množství vyráběného paliva, nahrazují své stroje modernějšími typy. Menší skupinu uživatelů tvoří také rekreační piloti, jejichž spotřeba paliva je v porovnání se společnostmi zanedbatelná a odvíjí se podle stanovené ceny na trhu. [11]

Tab. 2 Srovnání spotřeby paliv v USA [12]

Rok	Celková spotřeba v milionech galonů	
	Tryskové palivo	Letecký benzín
1995	17629	289
1996	18187	291
1997	18889	294
1998	19697	313
1999	20396	347
2000	21211	349
2001	22293	354
2002	23295	359
2003	24405	364
2004	25475	369
2005	26575	374
2006	27746	379
2007	28960	384
2008	30220	389
2009	31499	393
2010	32841	398
2011	34210	402
2012	35612	406

## 1.4 VLASTNOSTI PALIV

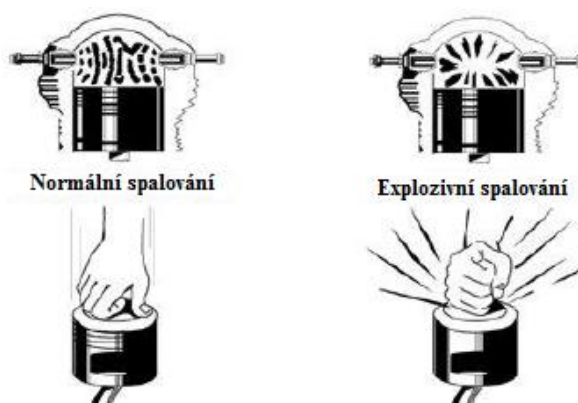
Při spalování leteckého benzínu se uvolňuje velké množství energie, která pohání zážehové motory. Náročné prostředí jako je okolní teplota a tlak výrazně mění jeho vlastnosti. Paliva jsou těkavá a velmi hořlavá s nízkým bodem vznícení. Pro správnou funkci motoru musí zajistit nepřerušovaný průběh spalování, aby nedocházelo k explozím nebo detonacím v pracovním prostoru. [4]

### ENERGETICKÝ OBSAH

Jde o významnou vlastnost spojenou s výkonem motoru. Základní jednotkou je megajoule na kilogram (MJ/kg) a megajoule na litr (MJ/l). Měří se jako uvolněné teplo během spalování paliva za určitých podmínek. Množství tepla závisí na tom, zda voda vytvořená během spalování zůstává ve formě páry nebo se mění na kapalinu. Jestliže kondenzuje na kapalinu nazýváme tento průběh jako hrubý obsah energie. Pokud si však zachová plynné skupenství, hovoříme o čistém obsahu energie, který je nižší. Tato vlastnost slouží pro srovnávání paliv. Výkon z velké části závisí na konstrukčních řešeních motoru, především na velikosti válců a kompresním poměru. [3]

### ODOLNOST PROTI DETONACÍM

Zajišťuje hladký a spolehlivý provoz motoru. Měřítkem odolnosti je oktanové a výkonnostní číslo, které dávají palivu schopnost odolávat klepání během hoření ve spalovací komoře. Antidetonační vlastnosti jsou testovány pomocí měření chudého a bohatého poměru směsi paliva se vzduchem. Každý motor je navržený na palivo, kterého ho chrání proti klepání. Když se použije benzín s nižší ochrannou hodnotou proti detonacím, hrozí vážné poškození hnací soustavy letounu. Naopak palivo s vyšším oktanovým číslem nezpůsobí potíže, ale nepřináší žádné výhody. Klepání se v leteckém průmyslu nazývá detonace, která je způsobena explozivním spalováním (obrázek 1.3). Jde o rychlý a prudký výbuch směsi při vysoké teplotě a tlaku ve spalovací komoře. Vytvořená rázová vlna se přenáší z pístu na pístní čep a pak přes ojnici na klikovou hřídel. Varovným signálem je cinkání, které u letadel není dobře slyšet kvůli hluku motorů a vrtulí. Příčinou vzniku může být vysoká teplota při velkém výkonu motoru (například během vzletu), předčasné zapálení směsi nebo vysoké otáčky při nízké letové rychlosti. [3], [4]

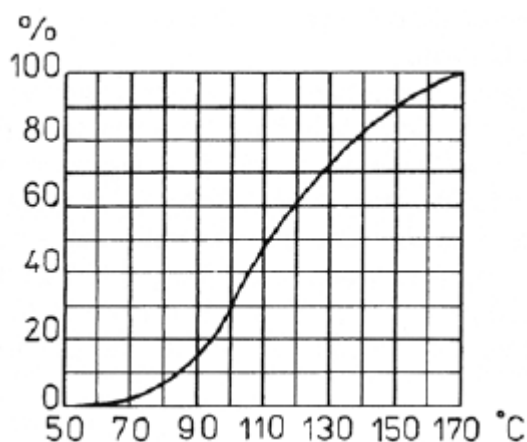


Obr. 1.3 Porovnání průběhů spalování [5]

Provozní podmínky motoru nejsou konstantní a správný chod nastává při vysoké pracovní teplotě, vysokém kompresním poměru a nízkých otáčkách. Slabé klepání nezpůsobuje vážné komplikace za letu, ale dlouhodobé a intenzivní může vést ke ztrátě výkonu nebo přehřívání částí motoru. Z těchto důvodů je důležité používat správný druh paliva a provádět pravidelné údržby zařízení. [3], [4]

### TĚKAVOST

Je schopnost látky přeměnit se z kapaliny na páru, která je ovlivněna tlakem a profilem destilace. Letecký benzín se musí dobře odpařovat, aby správně hořel ve spalovacím prostoru. Odpařování se hodnotí pomocí destilační křivky vyjadřující závislost odpařeného množství paliva na teplotě. Podle obrázku (1.4) začátek destilace, kdy se odpaří 10 % paliva nesmí překročit teplotu 80 °C a popisuje startovací vlastnosti motoru. Poloviční objem pohonné látky se vypařuje při 110 °C, což odpovídá optimálním podmínkám pro stálost chodu. Konec destilace představuje dobu, kdy se odpaří 90 % paliva a teplota nemá být vyšší než 145 °C. Motory využívají pro dodávání paliva do válců karburátor nebo vstřikovací systém. Karburátor je zařízení, které rozprašuje benzín do proudu vzduchu nasávaného do válce, kde dochází ke spalování. Oproti tomu vstřikovací systém přivádí směs přímo do spalovacího prostoru. Specifikace na těkavost benzínu jsou stejné pro obě varianty. Slabá těkavost zpomaluje proces odpařování, což se projevuje pomalým ohřevem motoru na pracovní teplotu, špatným zrychlením nebo nerovnoměrným dodáváním paliva do válce. Větší těkavost snižuje možné komplikace letadel při startu a v průběhu letu. Na druhou stranu může docházet k namrzání karburátoru nebo změně látky z kapalného skupenství na plynné. [3], [4], [7]



Obr. 1.4 Destilační křivka leteckého benzínu [7]

## TEKUTOST

Letecký benzín jako ostatní kapaliny začíná při nízkých teplotách mrznout. Na rozdíl od vody se skládá z několika druhů uhlovodíků, které mají různý bod tuhnutí. Proto nedochází k zamrznutí během jedné teploty, ale postupně po jednotlivých složkách. Tento průběh se nazývá krystalizace. Palivo je vystavováno chladným podmínkám jak ve velké nadmořské výšce, tak i na zemi. Kvůli tomu si musí udržet dobrou tekutost, jinak se může stát, že dojde k omezení nebo úplnému přerušení dodávky paliva do motoru. V nadmořské výšce okolo 3000 metrů je průměrná teplota  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a v 6000 metrů dosahuje až  $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Uhlovodíky s nižší molekulovou hmotností jsou odolné proti krystalizaci, ale těžší ji snadno podléhají. Bod tuhnutí je silně ovlivněn množstvím uhlíku (odolnost paliva vůči mrazu roste) ve sloučeninách a také schopností molekul měnit svůj tvar. Obecné požadavky na AVGAS požadují, aby zůstal v kapalném stavu do teploty  $-58\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [3]

## STABILITA A SKLADOVÁNÍ

Stabilita paliva závisí na reakci látek mezi sebou nebo se vzduchem. V průběhu reakcí vznikají rozpustné gumy a nerozpustné částice, které ucpávají filtry nebo se usazují na stěnách palivového systému, čímž snižují průtok pohonné látky do motoru. Při správné výrobě, manipulaci a vhodném skladování je letecký benzín stabilní minimálně jeden rok. V případech, kdy je uložen delší dobu se musí otestovat, zda je stále vhodný k použití, protože může nastat řada reakcí. [3]

Hlavní reakce během skladování:

- Oxidace reaktivnějších uhlovodíků
- Oxidace tetraetylolova do formy nerozpustné pevné látky
- Vypařování těkavějších složek uhlovodíků

Reaktivní molekuly jsou příčinou nestabilních reakcí, jejichž rychlost závisí na teplotě prostředí. Dobrým příkladem jsou sloučeniny s velkou těkavostí, které se mohou odpařovat a ztrácet v atmosféře. Při ztrátě velkého množství těchto látek dochází ke zvýšení koncentrace tetraetylolova nad povolenou hranici a zároveň klesá tlak par pod minimální hodnotu. Tyto procesy narušují stanovené vlastnosti paliva a ohrožují jeho stabilitu. [3]

## KOROZIVNÍ VLASTNOSTI

Letecký benzín při distribuci a použití v provozu přichází do styku s různými materiály. Skládá se z uhlovodíků, které nekorodují při kontaktu s dalšími kovy, ale obsahuje i látky působící agresivně, kam patří sloučeniny síry a organické kyseliny. Z tohoto důvodu výrobci letadel provádí rozsáhlé testování materiálů, zejména pro palivový systém, aby se předešlo pozdějším komplikacím. [3], [7]

## ČISTOTA

Z hlediska bezpečnosti je kladen důraz na to, aby palivo nebylo kontaminováno žádnými nežádoucími látkami. Čistota je nejčastěji ohrožena vodou, protože při nízkých teplotách zamrzá a ve formě pevných krystalků ucpává palivový filtr. Existuje nemrznoucí přísada, které tomu zabráňuje a přidává se přímo do paliv nebo během tankování. Tato sloučenina se nazývá diethylenglykol a plní funkci nemrznoucí směsi. Kromě toho voda podporuje rezivění kovů a růst mikroorganismů, především na rozhraní dvou látek. [3], [4]



Výroba leteckého benzínu probíhá rafinací frakcí při vysoké teplotě, která zajišťuje jeho čistotu. Ke znečištění dochází vlivem drobných částic přítomných ve vodě a vzduchu. Růst mikroorganismů je ovlivněn několika faktory, které urychlují tento vývoj. Patří sem sloučeniny síry a vyšší teplota prostředí. Podle reakce částic na vzduch se rozdělují na aerobní a anaerobní. Mikrobiální kontaminace paliva se ve větší míře vyskytuje u petrolejových produktů než u benzínů. Pravděpodobným důvodem je toxicita tetraetylova, která snižuje tento proces, ale přesto k němu může dojít. Nejlepší prevencí jak tomu zabránit je co nejvíce omezit přístup vody k palivu při skladování. [3]

Voda sama o sobě představuje mnohem větší problém než je na první pohled vidět. Vzduch přítomný v nádrži s palivem obsahuje vodní páru, která teplotními výkyvy kondenzuje na kapalinu. Velký obsah vody může vážně narušit plynulý chod motorů a ohrozit celou posádku. Vhodným řešením tohoto jevu je naplnit nádrž palivem ihned po přistání. Tím se velmi zmenší prostor pro případnou reakci. [4]

#### **1.4.1 BEZPEČNOSTNÍ VLASTNOSTI**

Letecké palivo se snadno vznítí a jeho výpary mohou být škodlivé. Proto je důležité dbát na správné manipulaci, která je uvedena v bezpečnostním listu od dodavatele.

##### **BOD VZNÍCENÍ**

Je nejnižší teplota, kdy dojde ke vznícení paliva. U AVGASU bývá okolo  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Hořlavost je ovlivněna množstvím par ve směsi se vzduchem, protože samotná kapalná část nehoří. Objem par ve vzduchu nesmí být příliš nízký ani velký. Dolní stanovená hranice je přibližně 1,2 % a horní 7 %. [3]

##### **ELEKTRICKÁ VODIVOST**

Náboje statické elektřiny vznikají při kontaktu dvou rozdílných povrchů. Jedním z příkladů je průtok paliva sacím potrubím. Rychlost rozptýlení náboje je úměrná schopnosti kapaliny vést elektřinu. Jednotkou je piko Siemens na metr ( $1\text{ Ps/m} = 1\text{ CU}$ ). [3]

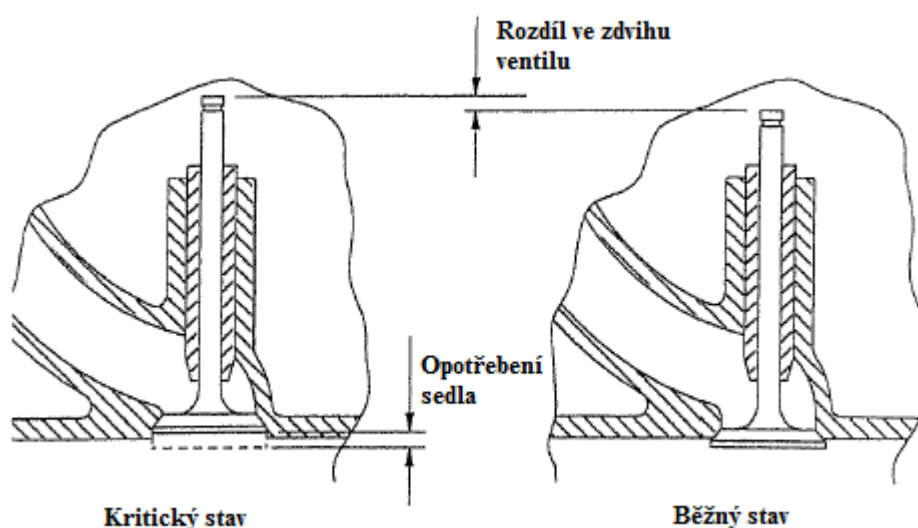
Letecký benzín má vodivost v rozmezí 1 CU až 10 CU, takže je špatným vodičem. Při proudění kapalin s nízkou vodivostí se vytváří náboje statické elektřiny mnohem rychleji než se rozptýlí. Když nashromážděná statická energie převyší ionizační energii vzduchu v pracovním prostoru válce, vznikají na povrchu paliva jiskry, které způsobují exploze. Vše probíhá za okolností, že rozsah hořlavých par je v předepsaném rozpětí. Prevencí proti explozím je uzemnění palivového systému, nižší čerpací rychlost a časová prodleva pro rozptýlení statických nábojů. Další možností je využití antistatických přísad, které působí tak, že zvyšují rychlost disipace částic, čímž dojde ke zlepšení samotné elektrické vodivosti. [3]

### 1.4.2 VLIV TETRAETILOLOVA NA LETECKÉ MOTORY, OKTANOVÉ A VÝKONNOSTNÍ ČÍSLO

Oktanové a výkonnostní číslo určuje odolnost proti detonacím. Vyšší hodnoty charakterizují lepší antidetonační vlastnosti a závisí na kritickém tlaku paliva. Oktanové číslo se určuje na speciálním jednoválcovém motoru s měnitelným kompresním poměrem (metoda chudé směsi). Při zkoušce se používá směs izooktanu a n-heptanu, která se porovnává s testovaným vzorkem pohonné látky. Jestliže letecký benzín má kritický tlak stejný jako uvedená dvojice uhlovodíků, znamená to, že oktanové číslo je stejné jako u izooktanu ve zkušební směsi. Nejvyšší hodnota výše zmiňovaného čísla může být 100, což odpovídá 100 % obsahu izooktanu a 0 % zastoupení n-heptanu v porovnávacím palivu. [4], [7],

Obsah oktanu může být vyšší než 100 a určuje se metodou bohaté směsi. Zkouška probíhá na jednoválcovém motoru s konstantním kompresním poměrem, rychlostí a teplotou vzduchu. V takovém případě se hodnota nazývá výkonnostní číslo. Tento pojem vyjadřuje zvýšení výkonu v procentech u motoru poháněného testovaným palivem ve srovnání s výkonem motoru používajícím čistý izooktan. Za zvýšeným obsahem oktanu stojí tetraetylolovo, které zároveň ovlivňuje teplotu a kritický tlak paliva. Do směsi se kromě olova přidávají i další látky, aby zabránily tvorbě pevných usazenin ve spalovací komoře. [4], [5], [7]

Přísada TEO zlepšuje výkon pístových zážehových motorů, chrání je proti předčasnému zapálení paliva, poškození sedla ventilu. Potíže s ventilem mohou nastat, když sedlo přestane správně těsnit při čtyřdobém pracovním cyklu. Sací ventil je otevřen při sacím zdvihu a výfukový ventil při odvádění spalin mimo spalovací komoru. V průběhu stlačení nebo expanze jsou oba bezpečně uzavřeny. Během sacího nebo výfukového zdvihu jsou na malý okamžik otevřeny společně, kvůli lepší účinnosti. Jestliže nefungují správně, tak není možné zajistit dostatečný tlak a potřebný uzavřený prostor ve spalovací komoře. To má za následek pokles výkonu a narušení plynulého chodu motoru. Příčinou netěsnění ventilu je opotřebení sedla vlivem tření. Z tohoto důvodu je tetraetylolovo (TEO) užitečné i jako mazivo. [5]



Obr. 1.5 Nesprávné těsnění sedla ventilu [5]

### 1.4.3 PŘÍSADY

Do leteckého benzínu se přidávají chemikálie rozpustné v uhlovodících, které zlepšují nebo zachovávají jeho vlastnosti. Podléhají přísným specifikacím a mezi povinné složky patří tetraetylolovo a identifikační barvivo. Ostatní povolené látky jsou zcela volitelné. [3]

#### ANTIDETONAČNÍ PŘÍSADY

Hlavní přísada tetraetylolovo má schopnost zvyšovat oktanové a výkonnostní číslo. Zároveň také snižuje výskyt peroxidů, které způsobují detonační spalování. Při hoření směsi dochází k přeměně olova na oxid olovnatý. Tato sloučenina působí korozivně na výfukové ventily, sedla ventilů a elektrody zapalovacích svíček. Proto se do paliva přidává etylen di-bromidu, který chrání komponenty motoru proti následkům koroze a pomáhá odstraňovat oxidy olova spolu se spaliny pryč z pracovního prostoru. Látkám tohoto typu se říká vynášec. [8]

#### NEMRZNOUCÍ LÁTKY

Isopropanol a jistá forma diethylenglykolu zabraňují tvorbě ledu v palivovém systému. Tyto látky nejsou součástí složení AVGASU a jejich použití závisí na uvážení provozovatelů letadel. Isopropanol je mnohem dražší a může snižovat schopnost paliva odolávat detonacím. Proto se jako častější volba využívá diethylenglykol. [3]

#### ANTIOXIDANTY

Některá paliva obsahují olefiny (uhlovodík s dvojnou vazbou), které snadněji reagují se vzduchem, což vede k tvorbě peroxidů, hydroperoxidů a různých nerozpustných částic. Smyslem antioxidantů je přerušit probíhající reakce uhlovodíků se vzduchem a zamezit vzniku vedlejších látek. [3]

#### BARVIVA

Používají se k barevnému odlišení jednotlivých druhů paliv. Současně používaný letecký benzín (AVGAS 100LL) pro pístové motory má modrou barvu a petroleje pro turbínové motory jsou bezbarvé. Tohle bezpečnostní opatření snižuje riziko nehod v důsledku nesprávné volby paliva. [3]

#### PŘÍSADY PRO ELEKTRICKOU VODIVOST

Z hlediska bezpečnostních opatření se do paliva přidávají látky pro zlepšení elektrické vodivosti. Smíchaná směs urychluje disipaci elektrických nábojů a zabraňuje explozím v pracovním prostoru. U upraveného leteckého benzínu se zvedne vodivost na 50-450 CU. Po nějakém čase poklesne, ale je možné ji zvýšit opětovným dodáním přísady až do limitu 5 mg/l. [3]

#### ANTI-KOROZNÍ LÁTKY

Dříve se používaly ve vojenském letectví, ale dnes jsou opět zavedené v normě ASTM. Zástupcem těchto přísad jsou karboxylové kyseliny, které přilnou ke kovovému povrchu a vytvoří ochranný povlak. [3]

## 2 BEZOLOVNATÁ PALIVA

Od poloviny 80. let provádí technické centrum FAA výzkum pístových motorů a spolu s ním i nových leteckých paliv. Hlavním cílem byla náhrada AVGASU 100LL bezolovnatým palivem se stejnými výkonnostními vlastnostmi. Zásadním parametrem je zde oktanové číslo. Dlouhodobé výzkumy ukázaly, že mezi olovnatými a bezolovnatými benzíny se stejným oktanovým číslem je velký rozdíl ve schopnosti chránit motor před detonacemi. Přidání TEO do paliva zajišťuje normální průběh spalování a prozatím lze nahradit pouze speciálními bezolovnatými chemikáliemi. Dobrý účinek na zlepšování antidetonačních vlastností mají také étery. [2], [6], [8]

### 2.1 PŘECHOD NA BEZOLOVNATÁ PALIVA

V roce 2011 vznikla letecká komise pro přechod na bezolovnatý benzín (UAT ARC). Jejím účelem je zajistit informace pro usnadnění vývoje a zavedení bezolovnatého paliva do provozu. Tyto postupy musí splňovat podmínky, aby změna měla co nejmenší dopad na stávající letouny s pístovými motory. Komise se skládá z několika členů, kam patří například výrobci motorů, paliv, FAA a agentura na ochranu životního prostředí (EPA). V roce 2012 předložila komise posudek s 5 hlavními doporučeními [6]:

- Zavedení podrobného plánu zahrnujícího několik kritérií (dopad na infrastrukturu, výrobu a distribuci, životní prostředí), které usnadní testování nových paliv
- Testování zkušebních paliv v technickém centru FAA (dosažené výsledky budou sloužit pro vývoj ASTM specifikací, což stanoví počet potřebných testů)
- Zavedení výběrového procesu bezolovnatých paliv do testovacího programu
- Vytvoření úřadu pro certifikaci bezolovnatých paliv
- Vytvoření sektoru leteckých pístových paliv (PAFI), který podle informací od UAT ARC zjednoduší vývoj a zavedení nových leteckých benzínů s ohledem na co nejmenší zásah do pístových leteckých motorů

Při přechodu z olovnatého benzínu na bezolovnatý, docházelo v silniční dopravě k předčasnému opotřebení nebo v krajních případech selhání motoru. V letectví se těmito problémy zabývá technické centrum FAA, které důkladně prověřuje všechny modifikace a alternativní paliva, aby se předešlo podobným rizikům. Úpravy budou pravděpodobně zahrnovat výměnu zastaralých hlav válců a ventilů pro spolehlivý provoz na bezolovnaté palivo. Většina úprav leteckých pístových spalovacích motorů se může inspirovat inovacemi pro automobilový průmysl. Tato skutečnost může způsobit, že přechod na bezolovnatý benzín nebude tak náročný. [13]

## 2.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VÝVOJ A ZAVÁDĚNÍ BEZOLOVNATÝCH PALIV

Podle rozsáhlých testů motorů a pohonných látek se zjišťuje, jestli paliva odpovídají vlastnostem AVGASU 100LL. Jestliže jsou všechna kritéria splněna, není nutné, aby FAA schvalovala úpravy pro využití v provozu. V opačném případě FAA stanoví provozní omezení testovaného paliva. Bezolovnatý benzín využívá jako náhradu za TEO velké množství chemikálií, aby dosahoval požadovaných antidetonačních vlastností. Chemikálie obsahují těžké molekuly s vyšším bodem varu, což způsobuje překročení stanovených specifikací. Porušení těchto norem má velký vliv na bezpečnost, výkon a provozuschopnost letounů. [2]

Z hlediska dlouhodobého výzkumu zatím neexistuje bezolovnaté palivo, které by zajišťovalo potřebné oktanové číslo při zachování bezpečnostních vlastností (tlak par, bod tuhnutí...). Tlak spotřebitelů vedl k tomu, že nové testované varianty, které částečně nesplňovaly všechny bezpečnostní a výkonnostní parametry byly zrušeny. Komise UAT ARC proto rozhodla, že není pravděpodobné, aby nová paliva vyhovovala celému leteckému parku. [2]

### 2.2.1 TRH A EKONOMIKA

Trh nepodporuje vývoj nových paliv, protože bezolovnaté varianty stále nedosahují kvalit AVGASU 100LL. Obavy z nízké poptávky, návratnosti investic a přísná bezpečnostní kritéria neumožňují trhu, aby naplno podpořil nové inovace. Trhy se skládají ze společností, které financují podobné projekty, a proto všechna rozhodování o tom, jaká paliva se budou vyrábět a následně prodávat jsou složitá. [2]

V posledních letech klesá prodej letounů s pístovými motory a ekonomický stav průmyslu se zhoršuje. Jestliže zákaz použití olovnatého leteckého benzínu bude rychlejší než nalezení vhodné bezolovnaté varianty, může dojít ke znehodnocení současných pístových letounů. Kromě toho cena, dostupnost a dopad paliv na výkon motoru jsou klíčové faktory, které musí být zahrnuty do vývojového procesu. [2]

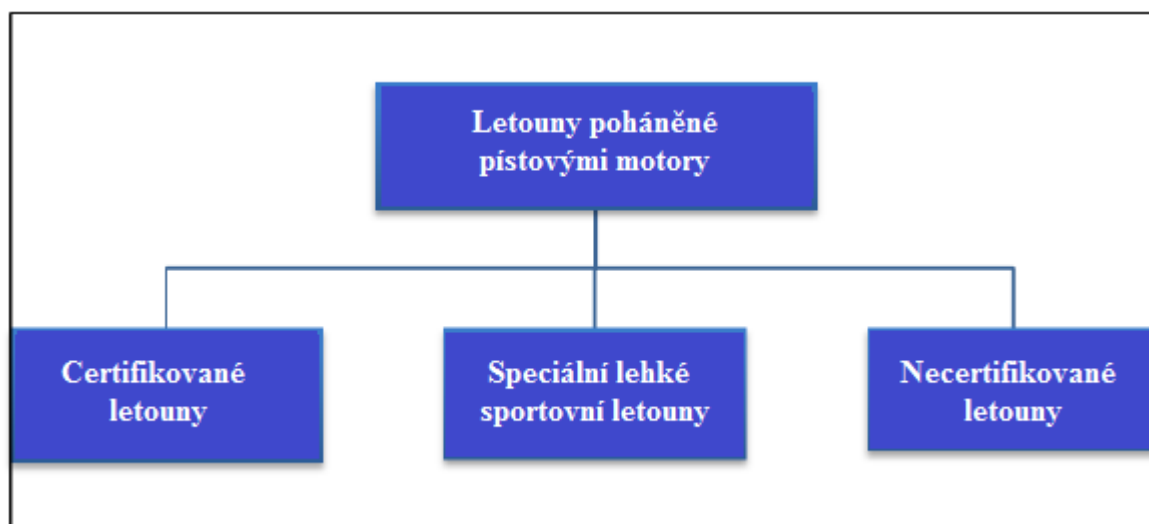
Tržní hodnota letounů se odvíjí od účinků paliva na životnost a výkonnost motorů. Paliva s výrazným negativním dopadem budou uchována a využita později, až se nalezne odpovídající technologie. Tímto způsobem se zajistí přirozený proces opotřebení současně provozovaných letadel. Komplikací však je snaha průmyslu udržet stroje dlouhodobě v provozu. Nedostatek nových typů vede k tomu, že průměrný věk pístových letounů je přibližně 39 a více let. Tato skutečnost naznačuje, že pravděpodobnějším postupem bude zavedení nového paliva i za cenu znehodnocení pístových zážehových motorů. [2]

### 2.2.2 CERTIFIKACE

Letecké benzíny jsou kontrolovány podle normy ASTM D910. Společnost ASTM International podporuje vývoj nových norem pro budoucí pohonné látky. Tento proces probíhá v několika fázích, při kterých se testují jednotlivé vlastnosti paliv. Rozsah zkoušek závisí na velikosti rozdílu ve složení a vlastnostech oproti AVGASU 100LL. Podle poskytnutých dat komise ASTM vyhodnotí celkový rozdíl a stanoví nové specifikace. Palivo nesmí mít nepříznivé účinky na životnost nebo bezpečnost motoru. Z tohoto důvodu uchazeči o certifikát musí potvrdit, že motor splňuje normy a je kompatibilní s novým palivem v celém rozsahu provozních podmínek. Kvůli tomu je složité zavést paliva, která by vyhovovala všem pístovým letounům. [2]

Motory a letouny jsou ověřovány podle současných palivových specifikací, což umožňuje certifikaci technického zařízení zcela nezávisle na vývoji nových alternativ. Ověřené certifikáty vydávají příslušné úřady FAA. Vzhledem k velkému množství poboček, vznikají komplikace při zavádění bezolovnatých paliv, kvůli odlišné certifikační politice (způsob vydávání certifikátu, ukončení platnosti). Dalším rizikem může být nestandardní uplatnění FAA předpisů. Pro úspěšné fungování certifikačního procesu bude důležité určit jednotný postup úřadů a omezit nedodržování schválených nařízení. [2]

Významný vliv na zavádění nových paliv mají náklady na vývoj, testování a distribuci. Převádění letadel pro provoz na bezolovnatý benzín je náročný technický úkol. Každé změny ve schválených palivech a úpravy motorů vyžadují potvrzení od FAA pro zajištění bezpečnosti. Čím více se vlastnosti navrhovaného paliva podobají AVGASU 100LL, tím mají menší ekonomický dopad na stávající letecký park. Pístové letouny se rozdělují na speciální kategorie (obrázek 2.1), kde nebude možné využít bezolovnaté palivo bez určitých technických úprav motorů.



Obr. 2.1 Rozdělení pístových letounů [2]

### **CERTIFIKOVANÉ LETOUNY**

Splňují předpisy a požadavky podle palivových specifikací. Budoucí zavádění bezolovnatého benzínu způsobí značné změny v těchto schvalovacích postupech. Pro motory a další komponenty bude nutné vydat nový certifikát, za předpokladu, že výrobce schválí použití nového paliva. [2]

### **SPECIÁLNÍ LEHKÉ SPORTOVNÍ LETOUNY (S-LSA)**

Rekreační letouny nejsou ověřovány certifikátem, ale výrobce prokazuje, že odpovídají příslušným normám. Veškeré technické úpravy a využití nového paliva lze provádět pouze se souhlasem výrobce. V případě, že letoun ztratí status S-LSA, získá experimentální certifikaci, která platí pro amatérsky sestavené stroje. Tato kategorie využívá jako palivo nízkootanový bezolovnatý benzín i AVGAS 100LL. [2]

### NECERTIFIKOVANÉ LETOUNY (EXPERIMENTÁLNÍ)

Speciální skupina, která nemá přesně stanovené požadavky na výkon, oktanové číslo, rozměry a stáří strojů. Do této kategorie patří především amatérsky sestavené letouny, různé prototypy a bývalé vojenské letouny. Společně mají významné zastoupení v leteckém parku. Stroje nemají přesně stanovený typ paliva, a proto je určuje majitel. [2]

### PALIVOVÉ SPECIFIKACE

Jsou důležitou součástí při certifikaci motorů a letadel. Podle tabulky 3 se rozdělují do sedmi kategorií. Nejrozsáhlejší testování určité kategorie závisí na chemickém složení navrhovaného paliva. Jestliže se ve složení vyskytují nové látky, bude nutné provádět podrobnější testy, aby se zajistila bezpečnost při použití. [2]

Tab.3 Přehled specifikací [2]

Kategorie	Parametr	Problém
<b>Spalování</b>	Oktan	Ztráta výkonu, poškození motoru
	Spalné teplo	Dolet, výstupní výkon
<b>Tekutost</b>	Bod tuhnutí	Dodávání paliva při nízkých teplotách
<b>Těkavost</b>	Destilace 10%	Studený start motoru
	Destilace 40%	Hromadění par v palivovém systému
	Destilace 50%	Zahřívání a přechodné změny plynu
	Destilace 90%	Distribuce paliva do spalovací komory
	Konec destilace	Neúplné spalování paliva
	Tlak par	Hromadění par, studený start motoru
	Hustota	Hmotnost a vyvážení letadla
<b>Koroze</b>	Obsah síry	Koroze, provozuschopnost
	Kovy	Koroze, vznik usazenin po spalování
<b>Kontaminace</b>	Voda	Koroze, zamrzání, rozpustnost v palivu
<b>Přísky</b>	Barvivo	Interakce přísad
<b>Stabilita</b>	Lepivé částice	Znečištění karburátoru, vstřikovací trysky

#### 2.2.3 DETONAČNÍ SPALOVÁNÍ

Náhrada AVGASU 100LL za bezolovnaté palivo ovlivní provozuschopnost letounů. Tato změna se projeví hlavně na spotřebě paliva, výkonu, maximální dostupné výšce a odolnosti proti detonacím. Pro budoucí letecký provoz je důležité, aby složení nové náhrady vykazovalo přibližné výsledky jako AVGAS 100LL. Velký rozdíl by měl negativní dopad na distribuční infrastrukturu. [2]

Chemické přísady zvyšují oktanové číslo, ale stále není jasné, jestli zajistí správný průběh spalování. Existuje řada problémů s detonačním spalováním, které bude nutné vyřešit [2]:

- Bezolovnatá paliva se stejným oktanovým číslem jako olovnaté benzíny nezajišťují stejný výkon motoru
- Pokyny od FAA pro vykonávání detonačních zkoušek používají zastaralé testovací metody
- Detonační zkoušky a měření nestálosti spalování nejsou ve vzájemném souladu mezi technickým centrem FAA a výrobcí motorů
- Nízký výkon bezolovnatých paliv bude vyžadovat značné úpravy motorů (kompresní poměr)

#### 2.2.4 PRODUKCE A DISTRIBUCE

Výroba leteckého paliva podléhá určitým kontrolním postupům. Rafinerie využívají speciální nádrže a potrubí, aby zajistily, že palivo je dostatečně odděleno od ostatních produktů. Po výrobě se stává předmětem distribučního systému, kde pomocí nákladních plavidel, automobilů nebo železničních vagonů je dopravováno do terminálů. Distribuční systém je velmi flexibilní a na odlehlá letiště se pohonné látky dopravují ve formě barelů. V poslední fázi se skladované palivo natankuje přímo do letounu. [2]

Průzkumy UAT ARC zjistily, že současná technologie rafinerských společností a infrastruktura je schopna dodávat bezolovnatý benzín, pokud se složení a výrobní postupy budou co nejvíce podobat AVGASU 100LL. Tyto aspekty zabrání komplikacím při distribuci, ale i technickým úpravám letounů. Výkon je zásadním parametrem, který však nedovoluje novým palivům, aby odpovídaly celkovému charakteru AVGASU 100LL. Proto je pravděpodobné, že velkému dopadu na letecký průmysl z hlediska výroby i distribuce nelze zabránit. Tyto dopady se odvíjí od palivových specifikací, a proto se UAT ARC zaměřila na vytvoření strategie, která pomůže průmyslu zjistit vliv na produkční a distribuční systém, aby bylo možné využívat nová paliva v provozu. Z hlediska výroby byly určeny tyto vlivy [2]:

- Problémy s výchozím produktem a výrobním procesem
- Kontrola kvality při zvyšování produkce

Z hlediska distribuce jsou zahrnuty tyto faktory [2]:

- **Kompatibilita materiálů** – pokud bezolovnatý benzín není kompatibilní s některou částí distribučního systému (těsnění nebo jiné součásti), je potřebné vyvinout náhradní součásti před zahájením distribuce
- **Geografický dopad** – pro paliva vyráběná v určité oblasti je nutné určit, jestli nemají specifický dopad na distribuční systém
- **Kompatibilita paliv** – nekompatibilní paliva spolu nesmí přijít do kontaktu, a proto musí mít samostatné nádrže a distribuční systém
- **Stabilita při skladování** – AVGAS 100LL zůstává velmi stabilní při dlouhodobém skladování a pro bezolovnatý benzín je nutné tuto schopnost řádně otestovat
- **Označení paliv** – zavádění nových označení na nádržích a potrubích pro bezolovnaté benzíny



### 2.2.5 ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Nová paliva musí splňovat kromě požadavků na výkon i normy týkající se životního prostředí. Testy se zaměřují především na emise a toxicitu zkoumané pohonné látky. Pokud bezolovnatá paliva budou způsobovat nebo přispívat ke znečišťování ovzduší, tak EPA ve spolupráci s technickým centrem FAA navrhne patřičné bezpečnostní normy. Stanovené předpisy se otestují v praxi a následně se přepracují do finální podoby. Normy zahrnují kromě požadavků na ochranu životního prostředí také hodnocení hluku, bezpečnosti a nákladů. Paliva s novými přísadami budou testovány daleko podrobněji oproti současným leteckým benzínům. Využívání chemických látek ke zlepšení oktanového čísla zvyšuje riziko znečišťování ovzduší. Proto je důležité, aby nové pohonné látky nepředstavovaly větší riziko než AVGAS 100LL. [2]

## 2.3 ALTERNATIVNÍ NÁHRADY LETECKÉHO OLOVNATÉHO BENZÍNU

Problémy s leteckým olovnatým benzínem se řeší již řadu let. Vysoké nároky na kvalitu spolu s neznámým rozsahem modifikací leteckého parku jsou hlavními příčinami pomalého procesu zavádění bezolovnatého paliva. Jakmile se podaří překonat tyto překážky, lze očekávat postupné vstupování nových paliv na trh.

### 2.3.1 MOGAS

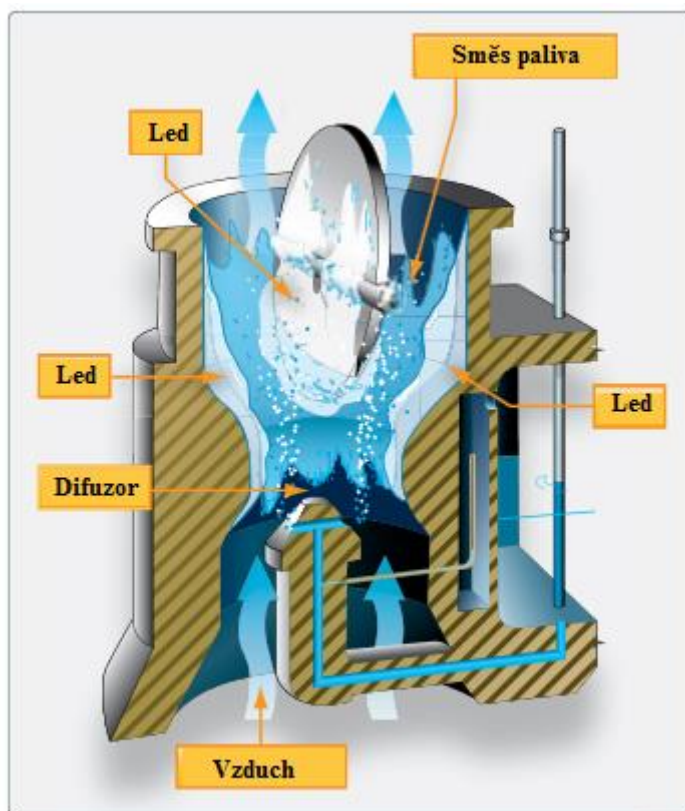
Bezolovnaté palivo používané pro automobilový průmysl. Podle certifikačního programu experimentální letecké asociace (EAA) a STC osvědčení od agentury FAA je možné tento typ využít u letadel s motory schválenými na nízkooktanové palivo. Je velmi důležité získat certifikát před začátkem využívání paliva v konkrétním typu letounu, aby se zachovala bezpečnost při letu. STC slouží jako doklad o podrobení stroje přísným zkouškám před schválením určitých úprav. Změny se mohou týkat palivového systému, aby se zabránilo vzniku parního uzávěru, což může vést k výměně palivových čerpadel. MOGAS způsobuje menší zanášení válců nečistotami a motory na nízkooktanový benzín mají delší životnost oproti použití AVGASU 100LL. Pro zajištění bezpečného provozu leteckých motorů na automobilový benzín nesmí být antidetonační číslo (AKI) menší než 87. Jedná se o formu oktanového čísla pro automobilová paliva, která odpovídá přibližně hodnotě 82 u leteckých paliv. FAA ani EAA nedoporučují pokles oktanového čísla pod 80, protože nelze zajistit dostatečnou účinnost motoru, vnitřní teploty a výkon. Nízké pořizovací náklady a kompatibilita s přibližně 70 % leteckého parku s pístovými motory jsou hlavními přednostmi tohoto paliva. [5]

### NEVÝHODY MOGASU

Větší těkavost oproti leteckému palivu může způsobit vyšší výskyt parních uzávěrů ve vysokých nadmořských výškách a teplotách. Parní uzávěry vznikají v palivovém potrubí, kde se zbytkové palivo přehřívá a odpařuje, což narušuje tok paliva do motoru. Tyto vzduchové kapsy mohou být příčinou zhasnutí motoru a také komplikují opětovný vzlet letadla. Na trhu existují speciální testy, které zjišťují četnost parních uzávěrů. Dalším způsobem jak tomu zabránit je instalace přídavných palivových čerpadel pod úhlem 45° namísto 90°. [5]

Při odpařování dochází ke změně kapaliny na plyn, což se může projevit zamrzáním karburátoru (obrázek 2.2), jestliže se v palivu nachází voda. Vysoká těkavost a vlhkost jsou dobré podmínky pro tvorbu ledu, který omezuje tok paliva a způsobuje ztrátu výkonu. Větší část letadel je vybavena ohříváním karburátoru, které pomáhá předcházet tomuto jevu. [4], [5]

Výrobci motorů a ropné společnosti nedoporučují použití MOGASU, protože nepodléhá tak přísným požadavkům na kvalitu jako letecký benzín. Paliva používaná v letectví nesmí obsahovat žádné částice, vodu ani jiné znečišťující látky, jinak se musí přepravit zpět do rafinérie na přepracování. [5]



Obr. 2.2 Zamrzání karburátoru [4]

### 2.3.2 82UL

Palivo určené pro pístové motory s nízkým kompresním tlakem. V roce 1999 agentura FAA na základě testů schválila využití 82UL v letadlech, která mohou létat na MOGAS. Cílem výroby bylo nahradit letecký benzín 80/87. Vzhledem k tomu, že část leteckého parku neměla typové osvědčení od FAA, bylo by nutné vyvinout další palivo. Tento systém se dvěma palivy je ekonomicky náročný, a proto se ustoupilo od výroby. [5]

### 2.3.3 91/96 HJELMCO OIL

Bezolovnatý benzín s nízkou toxicitou, vhodný pro nízkooktanové pístové motory, které nevyžadují žádné úpravy. Výrobci motorů jako Lycoming, Continental a Rotax potvrdily využití tohoto paliva ve svých produktech. 91/96 splňuje všechny požadavky normy ASTM D910, ale neobsahuje barvivo ani olovo (množství 0,002 g/l se považuje za zanedbatelné množství). V porovnání s olovnatým benzinem je levnější a má nižší přepravní náklady. Výhodou je, že motory dosahují delší životnosti, což výrazně snižuje provozní náklady. [5], [14]

Švédská firma Hjemlco Oil získala prostor pro zavedení paliva na trh z několika důvodů: [5]

- Ropné společnosti se zaměřily na vývoj jednoho paliva pro celý letecký park, protože poptávka po nízkooktanových benzínech klesala
- Švédský trh podporuje zavádění paliv šetrných k životnímu prostředí (tento fakt vedl k náhradě 80/87 za 91/96)
- Přizpůsobení stávající infrastruktury (přepravní cisterny, nádrže)

Velká část pístových letounů je certifikována na použití 91/96, které je uznáváno i společností EASA. Hjemlco Oil se také snaží vytvořit vysokooktanové palivo podle ekologických požadavků, aby pokryla poptávku pro celý letecký park. [5], [14]

#### 2.3.4 94UL

Složení je velmi podobné jako u AVGASU 100LL a splňuje téměř všechny požadavky normy ASTM D910. Podle průmyslu jde o palivo budoucnosti, které pokryje přes 80 % letounů s pístovými motory. Zbývá část bude moci používat řídicí systémy (FADEC) nebo jiné systémy zážehového zapalování, které zabrání detonacím. Systém FADEC dokáže zvyšovat účinnost a výkon motoru, ale ovládá také vstřikování, směšování a dobu zapalování paliva. Aby byly schváleny agenturou FAA vyžadují dva oddělené zdroje výkonu (dvě baterie). Tyto systémy nebyly navrženy, aby umožnily motorům na vysokooktanové palivo přijímat nízkooktanový benzín a zabraňovaly jejich detonacím. Pro budoucí přechodné období mezi olovnatými a bezolovnatými benzíny však budou plnit i tuto funkci. Nevýhodou jsou ovšem vysoké pořizovací náklady. Jinou možností jak zabránit detonacím je změna průtoku paliva. Jestliže 94 UL projde testy a bude zvoleno jako náhrada za AVGAS 100LL, stane se, že současné motory budou ztrácet svoji životnost. Nově vyráběné motory tak budou muset zajistit potřebný výkon na nízkooktanové bezolovnaté palivo. [5]

#### 2.3.5 AVGAS 100LL SE SNÍŽENÝM OBSAHEM OLOVA

Tato varianta může tvořit přechodné palivo po dobu, než se vyvine vhodná bezolovnatá látka pro letecký průmysl. Oproti běžnému AVGASU 100LL má výrazně omezený obsah olova o 20-50 %. Pro zajištění dostatečného oktanového čísla se úbytek olova nahrazuje oksylichovadlem (ethylterciární butylether). Pokud by se ukázalo, že odstranění polovičního množství olova je nespolehlivé nebo nebezpečné, průmysl se může vrátit k původnímu AVGASU 100LL bez velkých komplikací v infrastruktuře. Ti, kdo tento přístup kritizují se domnívají, že vhodnější je přímý přechod na bezolovnatá paliva tak, aby výrobci mohli začít vyrábět motory a další technické zařízení přizpůsobené pro nový druh pohonné látky. [5]

#### 2.3.6 100SF

V roce 2008 společnost Swift Enterprises představila nový druh syntetického paliva pocházejícího z bioproduktů, které dosahuje vyšší hodnoty oktanového čísla než 100. K výrobě tohoto paliva se používá zdroj sacharidů, jakým je čirok, tráva, cukrová řepa případně rostlinný odpad. Dostupnost těchto zdrojů zaručuje bezproblémovou obnovitelnost paliva. Ty se následně přemění na alkohol, který pomocí další reakce transformuje vytvořené prvky do jednoho nebo více uhlovodíků. Vytvoří se dvě složky z čehož jedna může dosahovat oktanového čísla 136 a druhá 92, která je odvozena během procesu rafinace. Proces rafinace eliminuje kontaminaci složek, protože jsou vystaveny vysokým teplotám, které ničí bakterie. Směs těchto složek dohromady dává výsledné oktanové číslo s hodnotu 102. [5], [15]

Mezi hlavní výhody patří větší obsah energie (přibližně 13 % na galon), lepší antidetonační vlastnosti než vykazuje AVGAS 100LL a menší opotřebení motoru. Při testování bylo zjištěno, že změna načasování v zapálení směsi o 3 stupně zlepšuje výkon, takže palivo má dostatek času na spálení v pracovním prostoru. Správné načasování zápalu se ukazuje jako jediná nutná úprava motoru, což usnadňuje přechod na nové palivo. Na druhou stranu 100SF dosahuje vyšších teplot výfukových plynů v porovnání s olovnatým benzínem. Tyto teploty je nutné před samotným použitím paliva prověřit, jestli nemají negativní vliv na komponenty motoru. [5], [15]

### **2.3.7 G100UL**

Společnost General Aviation Modification, Inc (GAMI) je výzkumné centrum provádějící certifikace a testování. V roce 2009 se rozhodla využít znalosti získané v leteckém oboru pro výzkum bezolovnatých paliv a zanedlouho vyvinula první prototyp G100UL. Podle názvu paliva je patrné, že oktanové číslo dosahuje hodnoty 100. V porovnání s použitím 100LL je lehce těžší, ale může být kombinováno s tímto palivem v libovolném množství, aniž by narušilo funkčnost pístového leteckého motoru. Na rozdíl od 94UL může být použito i v motorech s vysokým výkonem. Palivo navíc neobsahuje žádné toxické látky a splňuje i potřebné antidetonační vlastnosti. [5], [16]

## ZÁVĚR

Letecké benzíny jsou od počátku rozvoje ve 40. letech minulého století závislé na tetraetylolovu. Tato složka má pozitivní vliv na výkon a plynulé spalování paliva v pracovním prostoru pístového motoru. Olovo je však toxické a zákony na ochranu ovzduší se snaží tuto látku odstranit. Cílem této práce bylo popsat v současnosti dostupná paliva a problematiku s postupným přechodem na paliva šetrnější k životnímu prostředí.

V první kapitole jsou stručně popsány vlastnosti, požadavky na kvalitu a spotřeba olovnatých benzínů (AVGAS). Technický pokrok v oblasti leteckých motorů způsobil, že využití pístových zážehových motorů pokleslo. Na trhu se objevily nové tryskové motory, které našly své uplatnění v komerčních letounech. Tyto letouny používají speciální tryskové palivo, což vedlo ke snížení poptávky po leteckých benzínech typu AVGAS. Výrobci pohonných látek zareagovali na nepříznivý vývoj vyrobením nového benzínu pod názvem AVGAS 100, který se v upravené formě využívá dodnes.

Ve druhé kapitole se autor práce zabývá bezolovnatými palivy a jejich překážkami se zaváděním do provozu. Hlavní snahou výzkumných společností je nalézt vhodnou bezolovnatou alternativu, která bude svými vlastnostmi odpovídat palivu AVGAS 100LL.

Podle autora práce je největší komplikací nalezení takové přísady, která nejen zvýší oktanové číslo, ale i zajistí dobrou odolnost proti detonačnímu spalování. Spousta navržených paliv je schopna zaručit pouze jednu z podmínek. Jako velmi nadějná náhrada za AVGAS 100LL se jeví palivo 100SF od společnosti Swift Enterprises, které má vyšší oktanové číslo a při testování se ukázalo, že dosahuje i lepších antidetonačních vlastností. Dalším faktorem, který brání zavádění paliv na trh je pomalý a složitý proces certifikace. Na závěr bych uvedl, že pro efektivnější schvalování produktů bude nutné, aby technické centrum FAA a společnost ASTM International značně zlepšila vzájemnou komunikaci při certifikačním procesu..

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] SHELL. *THE AEROSHELL BOOK* [online]. 2012 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: [http://www.shell.com/business-customers/aviation/aeroshell/knowledge-centre/the-aeroshell-book/\\_jcr\\_content/par/textimage\\_1433441235.stream/1445039847869/8569d8853bc1b4677e222cdc9ab8a2fbd90a80941acdab1a8b85d4918ad5a84b/theaeroshellbook.pdf](http://www.shell.com/business-customers/aviation/aeroshell/knowledge-centre/the-aeroshell-book/_jcr_content/par/textimage_1433441235.stream/1445039847869/8569d8853bc1b4677e222cdc9ab8a2fbd90a80941acdab1a8b85d4918ad5a84b/theaeroshellbook.pdf)
- [2] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *Unleaded Avgas Transition ARC* [online]. 2011 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/rulemaking/committees/documents/media/UATARC-1312011.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/rulemaking/committees/documents/media/UATARC-1312011.pdf)
- [3] CHEVRON PRODUCTS COMPANY. *Aviation Fuel Technical Review* [online]. 2007 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: [https://www.cgabusinessdesk.com/document/aviation\\_tech\\_review.pdf](https://www.cgabusinessdesk.com/document/aviation_tech_review.pdf)
- [4] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *Chapter 14: Aircraft Fuel System* [online]. [cit. 2017-03-21]. Dostupné z: [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aircraft/amt\\_airframe\\_handbook/media/ama\\_ch14.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/ama_ch14.pdf)
- [5] CLOCHE, Marcellette. *Sustainable Aviation Gasoline Alternatives* [online]. 2010 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: <http://www.flyunleaded.com/mba.pdf>
- [6] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *Aviation Fuel Research and Development* [online]. 2013 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: [https://www.faa.gov/about/plans\\_reports/modernization/media/sec.910.pdf](https://www.faa.gov/about/plans_reports/modernization/media/sec.910.pdf)
- [7] KOCÁB, Jindřich a Josef ADAMEC. *Letadlové motory*. 1. vyd Praha: KANT, 2000. ISBN 80-902-9140-6.
- [8] KRÍŽ, Josef. *Lietadlové pohonné jednotky*. 1. vyd Žilina: EDIS, 2004. ISBN 80-807-0342-6.
- [9] ICAO [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <https://www.icao.int/about-icao/Pages/default.aspx>
- [10] Civil Aviation Authority [online]. [cit. 2017-04-28]. Dostupné z: <http://www.caa.cz/easa/zakladni-informace>
- [11] STORINO, Pasquale J. *Leads Continued Use In Avgas* [online]. 2014 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: [http://scholarship.shu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1642&context=student\\_scholarship](http://scholarship.shu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1642&context=student_scholarship)

- [12] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION. *Total Jet Fuel And Aviation Gasoline Fuel Consumption U.S. Civil Aviation Aircraft* [online]. [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: [https://www.faa.gov/data\\_research/aviation/aerospace\\_forecasts/2001-2012/media/Table%2022.pdf](https://www.faa.gov/data_research/aviation/aerospace_forecasts/2001-2012/media/Table%2022.pdf)
- [13] Replacing Leaded Aviation Gasoline with Renewable Ethanol. *The energy collective* [online]. [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: [http://www.theenergycollective.com/jemiller\\_ep/235571/draft-why-doesn-t-epa-replace-leaded-aviation-gasoline-renewable-ethanol](http://www.theenergycollective.com/jemiller_ep/235571/draft-why-doesn-t-epa-replace-leaded-aviation-gasoline-renewable-ethanol)
- [14] *Hjelmco* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: [http://www.hjelmco.com/pages.asp?r\\_id=13395](http://www.hjelmco.com/pages.asp?r_id=13395)
- [15] 100SF. *Global Air* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://blog.globalair.com/post/What-is-100SF.aspx>
- [16] G100UL: The future of fuels. *General Aviation News* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://generalaviationnews.com/2010/02/28/g100ul-the-future-of-fuels/>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<b>ZKRATKA</b>	<b>VÝZNAM</b>
AKI	Anti-knock Index
ASTM	American Society for Testing and Materials
AVGAS	Aviation Gasoline
DEF STAN 91-90	Defence Standard
EAA	Experimental Aircraft Association
EASA	European Aviation Safety Agency
EPA	Environmental Protection Agency
FAA	Federal Aviation Administration
FADEC	Full Authority Digital Engine Control
GAMI	General Aviation Modifications, Inc
ICAO	International Civil Aviation Organization
LL	low lead
MOGAS	Motor Gasoline
PAFI	Piston Aviation Fuels Initiative
SF	Swift Fuels
S-LSA	Special Light Sport Aircraft
TEO	Tetraetylolovo
UAT ARC	Unleaded Avgas Transition Aviation Rulemaking Committee
UL	unleaded